

# SYNTHESE DE SONS PAR MODELES PHYSIQUES DANS L'ENVIRONNEMENT CORDIS-ANIMA

## Caractérisation et exploration des potentialités de la spatialité des structures vibrantes

Nicolas CASTAGNE - Claude CADOZ

Nicolas.Castagne@imag.fr Claude.Cadoz@imag.fr

ACROE<sup>1</sup> - CLIPS<sup>2</sup>

Institut IMAG<sup>3</sup>

46 Av. Felix Viallet - 38031 GRENOBLE

*Dans l'environnement CORDIS-ANIMA développé à l'ACROE, il est possible de synthétiser des sons à partir de modèles physiques à constantes localisées de structures vibrantes. Cet article présente une caractérisation de la spatialité des structures CORDIS-ANIMA, distinguant leur espace des mouvements, leur extension spatiale et leur espace de simulation. S'appuyant sur un exemple, l'objet multidimensionnel "filament 2D", il met en évidence l'intérêt et les applications des modèles multidimensionnels.*

<sup>1</sup> Association pour la Création et la Recherche sur les Outils d'Expression. Ministère de la Culture et de la Communication.

<sup>2</sup> Laboratoire de Communication Langagière et Interaction Personne Système (CNRS, UJF, INPG).

<sup>3</sup> Fédération de laboratoires d'Informatique et de Mathématiques Appliquées de Grenoble (CNRS, INPG, UJF).

## 1. Introduction

La synthèse sonore par modèles de signaux est la plus courante et la plus éprouvée. Elle consiste à générer directement l'onde sonore par des procédés de traitement du signal. La synthèse de sons par *modèles physiques* se propose non pas de générer le signal sonore mais d'en simuler les causes, c'est à dire de simuler un objet physique oscillant. Cette démarche est en première analyse plus coûteuse en temps de calcul puisqu'elle suppose la production d'une information qui ne sera pas utilisée dans le signal sonore. Elle s'avère cependant particulièrement intéressante. En effet, lorsqu'un stimulus lui parvient, l'oreille y cherche des attributs et des relations qui lui permettent d'identifier l'origine du phénomène [RISSET 90]. Placé dans un environnement sonore synthétique, elle sera particulièrement sensible au fait qu'elle puisse lui attribuer une *authenticité*, au moins sur certains de ses aspects. C'est cette "*marque d'authenticité*" que vise d'abord la synthèse par modèle physique.

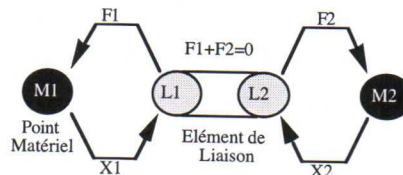
Dans son approche de l'utilisation de l'ordinateur pour la création artistique, l'ACROE s'attache en particulier à la modélisation physique, à la relation instrumentale et à l'importance du geste pour la création de sons. Le système CORDIS-ANIMA (voir encadré) et les Transducteurs Gestuels à Retour d'Effort [CADOZ 81] proposent un environnement de modélisation d'objets à constantes localisées, régis par des lois physiques, dédiés à la synthèse de sons et d'images animées, et avec lesquels l'utilisateur peut interagir gestuellement. C'est dans ce cadre que se place cette étude.

### CORDIS-ANIMA

Le formalisme CORDIS-ANIMA permet de modéliser les

objets physiques et leur comportement dynamique à partir d'atomes élémentaires, dont les caractéristiques découlent de considérations sur la nature des processus numériques interactifs et en temps-réel [CADOZ 90].

Deux types d'atomes permettent de construire les "objets CORDIS-ANIMA" : l'atome <MAT> (ou élément matériel), qui a une localisation dans l'espace et constitue la granulation de la matière et l'atome <LIA> (ou élément de liaison), qui représente les liaisons entre éléments matériels.



Parmi ces atomes, les quatre principaux sont :

- La *masse ponctuelle* : élément de type <MAT> auquel est associé un paramètre de masse  $m$  représentant l'inertie de la masse, et dont l'algorithme correspond à une résolution de l'équation fondamentale de la dynamique.
- La *masse ponctuelle d'inertie infinie* <SOL> : élément de type <MAT> dont la position est fixe.
- La *liaison viscoélastique* : élément de type <LIA> auquel est associé un paramètre de raideur  $k$ , un paramètre de viscosité  $z$  et un paramètre de longueur  $l$ . Son algorithme calcule une force en fonction des deux positions qu'il reçoit.
- La *liaison conditionnelle* : élément de type <LIA> tel que ses paramètres caractéristiques  $k$ ,  $z$  et  $l$  dépendent de conditions sur les variables de position en entrée. Ce type de liaison permet la modélisation de certaines non-linéarités.

La manière dont les différents points matériels d'un objet CORDIS-ANIMA sont reliés par des éléments de liaison est sa *connexité* ; elle n'est qu'évoquée



dans cet article et a fait l'objet d'études antérieures [INCERTI 95].

Les modalités suivant lesquelles un objet CORDIS-ANIMA s'inscrit, au repos et en mouvement, dans l'espace à trois dimensions définissent la *spatialité* de cet objet. C'est à cette *spatialité* que l'on s'attache dans cet article, sachant qu'elle a une incidence sur la complexité des calculs lors de la simulation de l'objet en vibration, sur les possibilités d'interaction avec celui-ci, mais aussi sur la nature du son.

Après avoir présenté une caractérisation de la spatialité des structures vibrantes CORDIS-ANIMA, nous montrons à l'aide d'un exemple, le "filament 2D", les potentialités des objets multidimensionnels.

## 2. Caractérisation de la spatialité d'une structure vibrante CORDIS

De manière générale, un objet CORDIS-ANIMA s'inscrit au cours de ses déformations dans un espace virtuel tridimensionnel, mais cet espace peut être dégénéré. La spatialité de l'objet, responsable d'une partie de son comportement, donc des sons qu'il produit, est déterminée par "l'espace de ses mouvements" et par son "extension spatiale" - la somme de ces deux espaces étant "l'espace de simulation".

### 2.1. Espace des mouvements

L'espace des mouvements est l'espace dans lequel se déplacent les atomes <MAT>. Sa dimension est égale au nombre de degrés de liberté de l'ensemble des <MAT> de l'objet. Elle est proportionnelle au nombre de ses variables dynamiques. La dimension de l'espace des mouvements a une incidence directe sur le coût de calcul lors de la simulation.

Lorsque les masses sont astreintes à se mouvoir suivant une dimension unique (fig. 1), nous parlerons d'objet à mouvements 1D.

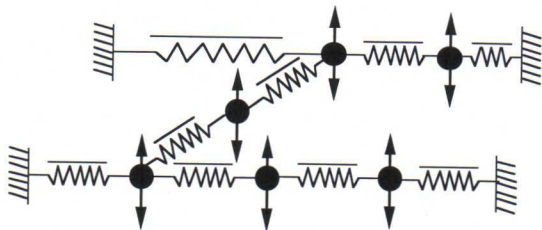


Fig 1 : représentation d'un espace des mouvements monodimensionnel pour un objet CORDIS.

Pour un tel objet à mouvements 1D, seules trois variables par point matériel sont à déterminer à chaque pas de calcul : position suivant l'axe des mouvements, position retardée, force suivant l'axe des mouvements.

Si un objet a la même connexité mais un espace des mouvements 2D ou 3D, le nombre de variables à déterminer pendant sa simulation double ou triple, et le coût de calcul augmente.

### 2.2. Extension spatiale

L'extension spatiale, second caractère de la spatialité de l'objet, se rapporte à la manière dont il occupe l'espace avant d'être excité.

L'extension spatiale caractérise :

- une partie des propriétés vibratoires de l'objet, permettant notamment de singulariser une ou plusieurs directions de ses mouvements ;
- la possibilité et le type de précontraintes applicables à l'objet.

Si l'extension spatiale de l'objet au repos est nulle (tous les points matériels sont concentrés à l'origine, voir fig. 2), nous parlerons d'objet-point. Dans un objet-point les longueurs au repos des liaisons sont nécessairement nulles. Par ailleurs il est impossible d'appliquer des précontraintes sans contredire le caractère ponctuel.

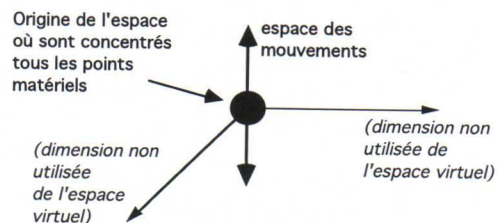


Fig. 2 : représentation de l'espace virtuel d'un objet-point au repos, à plusieurs masses. (objet à mouvements 1D)

La représentation d'un objet-point proposée ci-dessus est inexploitable. Il est nécessaire pour visualiser un objet-point de se placer dans un *espace de représentation* distinct de l'espace dans lequel il est défini. Des conventions de représentation pour de tels objets-points sont données dans le paragraphe 3, consacré à la version topologique de CORDIS-ANIMA.

Si avant excitation l'objet occupe une ou plusieurs dimensions de l'espace, on l'appellera "filament" (occupation d'une dimension), "surface" (occupation de deux dimensions) ou "volume" (les trois dimensions de l'espace sont remplies par l'objet au repos). Un tel objet peut recevoir des *précontraintes* qui lui confèrent une nouvelle forme au repos. Les directions de mouvements de ses masses ne sont, en outre, généralement pas équivalentes : différentes ondes peuvent s'y propager.



### 2.3. Espace de simulation

L'espace de simulation, ou espace virtuel de l'objet, est la somme de l'extension spatiale de l'objet au repos et de l'espace de ses mouvements.

L'espace de simulation est l'espace dans lequel est définie la distance cartésienne à considérer pour simuler l'objet. Par voie de conséquence, *c'est la dimension de l'espace de simulation qui détermine la linéarité ou la non-linéarité des équations qui régissent son évolution.*

## 3. La version "topologique" de CORDIS

### 3.1. Définition - représentation

Les objets CORDIS qui présentent les caractéristiques spatiales les plus simples sont les objets-point à espace des mouvements 1D. Une implémentation de CORDIS-ANIMA leur est dédiée : la version "topologique". Un objet "topologique" est déterminé par la topologie de son réseau de connexion. Il n'est pas représentable au repos dans son espace de simulation, dans lequel il est réduit à un point : deux conventions sont définies pour représenter un tel objet (fig. 3).

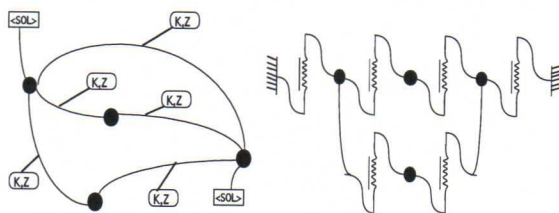


Fig 3 : représentations d'un même objet topologique. L'espace représenté n'est pas l'espace de simulation. A gauche : représentation "réseau de connexions", à droite : représentation "masses - ressorts".

### 3.2. Linéarité des équations

Dans l'espace de simulation d'un tel objet, la distance cartésienne entre deux points A et B est linéaire :

$$d(A,B) = \text{côte}(A) - \text{côte}(B) = x_A - x_B$$

En conséquence, à temps continu ou à temps discret, les équations de fonctionnement d'un objet topologique dont les <LIA> sont des liaisons viscoélastiques se réduisent au système matriciel :

$$M \cdot \ddot{X} = ([K] - [K_0]) \cdot X + ([Z] - [Z_0]) \cdot \dot{X} + F$$

où :

- X est le vecteur colonne des positions  $x_i$  ( $x_i =$

position de la masse  $i$  à l'instant  $t$ ) ;

- M est la matrice diagonale des inerties ( $m_{ii}$ =inertie du point matériel numéroté  $i$ ) ;

-  $[K]_{ij} = k_{ij}$  est la raideur de la liaison (masse  $i \leftrightarrow$  masse  $j$ ) et  $[K_0]$  est la matrice diagonale de "raideur totale aux points matériels" dont les

termes valent  $[K_0]_{ii} = \sum_{j=0}^{j=n} k_{ij}$  ;

-  $[K]_{ij} = k_{ij}$  est la viscosité de la liaison (masse  $i \leftrightarrow$  masse  $j$ ) et  $[Z_0]$  la matrice diagonale de "viscosité interne totale aux points matériels" dont

les termes valent  $[Z_0]_{ii} = \sum_{j=0}^{j=n} z_{ij}$  ;

- F est le vecteur colonne des forces extérieures appliquées aux masses de l'objet.

Ce système d'équations est linéaire ; il exprime qu'un objet topologique est très précisément équivalent à un filtre linéaire. Notamment, les déformations d'un tel objet sont directement proportionnelles à l'intensité de l'excitation : *un objet topologique ne comportant que des liaisons de type visco-élastique réagit linéairement à l'intensité de l'excitation qu'il subit.*

### 3.3. Intérêts et limites des objets topologiques

La version topologique de CORDIS a donné lieu à de nombreuses expérimentations et produit de nombreux résultats : elle a prouvé l'étendue de ses possibilités. Tout en proposant une importante diversité des structures et des timbres, elle reste économe en temps de calcul. Elle est optimale pour le calcul *temps réel*, nécessaire au contrôle gestuel via le Clavier à Retour d'Effort [CADOZ 81]. Remarquons en outre qu'elle permet dans une certaine mesure de s'affranchir des considérations précédentes sur la linéarité des équations grâce aux possibles liaisons conditionnelles non-linéaires.

Certaines particularités pertinentes, tant pour la qualité sonore que pour les modes d'interaction avec l'instrumentiste, restent cependant inaccessibles dans ce contexte strictement "topologique". C'est le cas, par exemple, de la modulation de tension, qui produit une modulation de fréquence caractéristique des cordes au moment de leur percussion. Il est intéressant d'étudier alors des structures à spatialité plus complexe.

## 4. Potentialités des objets CORDIS multidimensionnels : le

## "filament 2D"

Nous définissons maintenant un modèle CORDIS multidimensionnel particulier et nous étudions les propriétés qui découlent de sa spatialité.

### 4.1. Le modèle

Si, par rapport à la version "topologique" de CORDIS, nous ajoutons aux objets une dimension à l'espace des mouvements et leur conférons une extension spatiale, nous obtenons des objets "filament" à espace des mouvements 2D. C'est le plus simple d'entre eux que nous retenons pour cette étude : *le filament 2D homogène à connexité simple*, une masse n'étant reliée qu'à ses plus proches voisines.

La fig. 4 ci-dessous schématise le modèle étudié.

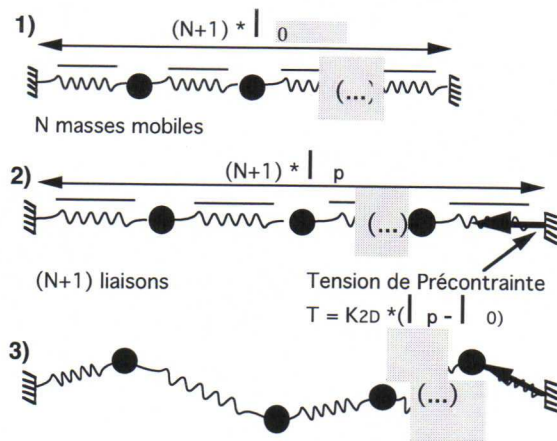


Fig. 4 : structure du filament 2D

- 1) au repos hors précontrainte,
- 2) précontraint,
- 3) en cours de simulation.

Paramètres pour ce modèle :

- nombre N de masses mobiles, inertie de chacune des masses : m ;
- raideur  $K_{2D}$ , longueur au repos  $l_0$  et viscosité  $Z_{int}$  des liaisons ;
- viscosité  $Z_m$  du milieu ambiant ;
- tension T de précontrainte, appliquée avant excitation en fixant la position du point fixe.

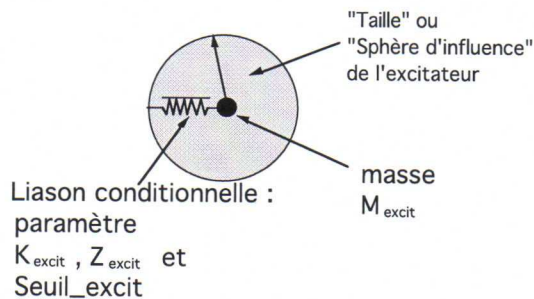


Fig. 5 : l'excitateur, lié par une liaison conditionnelle à une masse du filament, est projeté sur celle-ci, perpendiculairement, à la vitesse  $V_{init\_excit}$ .

Pour exciter le filament, un modèle d'excitation percussive est choisi (fig. 5) : un point matériel d'inertie M est relié à l'une des masses du filament par une liaison butée viscoélastique (raideur  $K_{excit}$ , viscosité  $Z_{excit}$ , zone d'influence  $Seuil_{excit}$ ), et projeté à la vitesse  $V_{init\_excit}$  sur cette masse, perpendiculairement au filament.

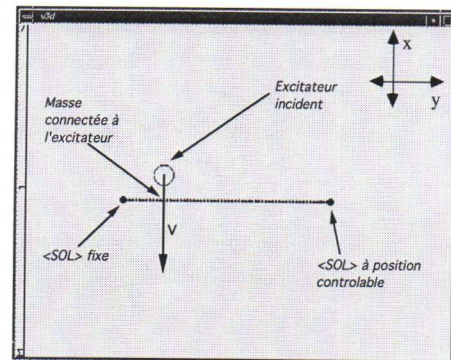


Fig. 6 : le filament 2D juste avant l'excitation.

### 4.2. Équivalent topologique pour les faibles excitations

Les équations régissant les déformations du "filament 2D" sont connues.

Dans l'hypothèse dite des "petites déformations" ou de "faible excitation", où pour chaque masse mobile et à chaque instant :

$$(x-x_0) \ll y,$$

hyp. 1 de "prépondérance des mouvements transversaux",

$$\text{et } y \ll l_p,$$

hyp. 2 de "non déformation de la structure du modèle",

ces équations sont linéarisables.

Au premier ordre, les équations linéarisées sont identiques à celles qui régissent le fonctionnement d'un modèle topologique, que nous appelons "modèle topologique équivalent" (fig. 7).



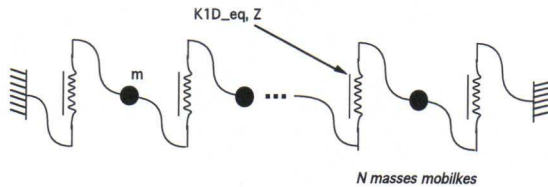


Fig. 7 : le filament topologique équivalent et ses paramètres CORDIS.

\* paramètres déduits du filament 2D :

- nombre de masses mobiles :  $N_{1D} = N$  ;

- masse  $m_{1D} = m$  ;

- raideur des <LIA> :

$$K_{1D\_eq} = T/l_p \\ = K_{2D} * (l_p - l_0) / l_p ;$$

- amortissement de milieu :  $Z_{1D,m} = Z_m$ .

\* paramètre indépendant du filament 2D :

-  $Z_{1D,int}$  = valeur faible arbitraire. Une faible valeur de viscosité interne aide à la stabilité du modèle sans modifier notablement son comportement.

Le filament 2D peut être considéré comme une complexification du modèle topologique équivalent.

### 4.3. Exploration paramétrique du modèle : différentes non-linéarités audibles et visualisables

L'exploration de l'espace des paramètres a mis en évidence trois catégories perceptives pertinentes.

En jouant sur les valeurs des paramètres ( $K_{2D}$ ,  $Z_{int}$ ,  $M...$ ), chacune de ces catégories peut être isolée et étudiée séparément et s'avère être indissociable de l'un des trois types de comportement non-linéaire que le filament 2D peut adopter.

#### 4.3.1. Type perceptif A et non-linéarité par allongement de la corde.

Ce comportement non-linéaire apparaît progressivement avec l'augmentation de l'intensité de l'excitation.

A l'audition (fig. 8), il se caractérise par une augmentation de la fondamentale au moment de l'excitation, puis par un glissement de cette fondamentale vers celle du modèle topologique équivalent.

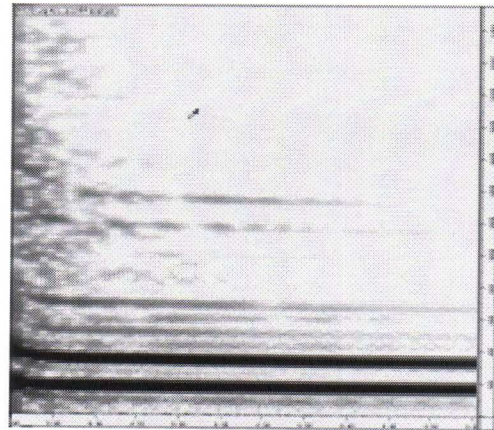


Fig. 8 : sonogramme présentant le type A.

La visualisation des déformations du filament met en évidence l'origine de cette catégorie perceptive (fig. 9) : elle provient de l'allongement global de la corde qui entraîne une augmentation des contraintes locales et de la force de rappel, donc de la fréquence de l'oscillation.

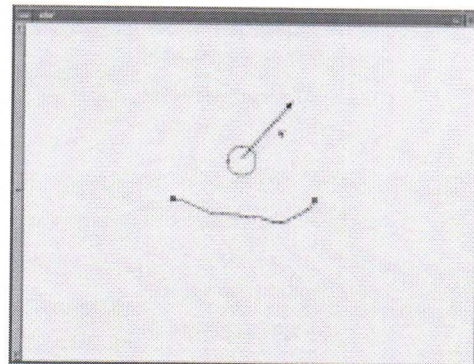


Fig 9 : filament siège d'un comportement non-linéaire de type A

La non-linéarité "par allongement" est généralement la première non-linéarité prise en compte lors des études à temps continu des équations de propagations dans les cordes [CUESTA 90]. Elle est particulièrement pertinente dans les cordes graves du piano lorsqu'elles sont excitées de manière importante.

#### 4.3.2. Type perceptif B et non-linéarité par couplage des modes

Le type B n'est réellement pertinent que pour certaines valeurs des paramètres ; son obtention nécessite notamment des valeurs de  $K_{2D}$  faibles et une sphère d'influence de l'excitateur (valeur de Seuil\_excit) importante.



A l'audition (fig. 10), il se caractérise par une modulation de la fréquence de la fondamentale, modulation qui s'atténue avec l'amortissement.

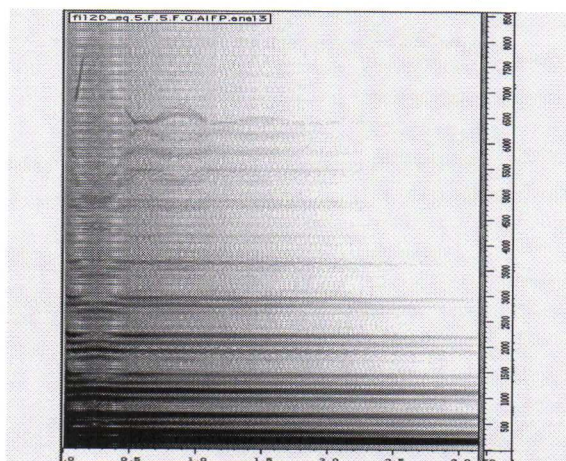


Fig. 10 : sonagramme présentant le type B.

La visualisation des déformations du filament (fig. 11) montre que ce type perceptif résulte du couplage des modes longitudinaux et transversaux de la corde.

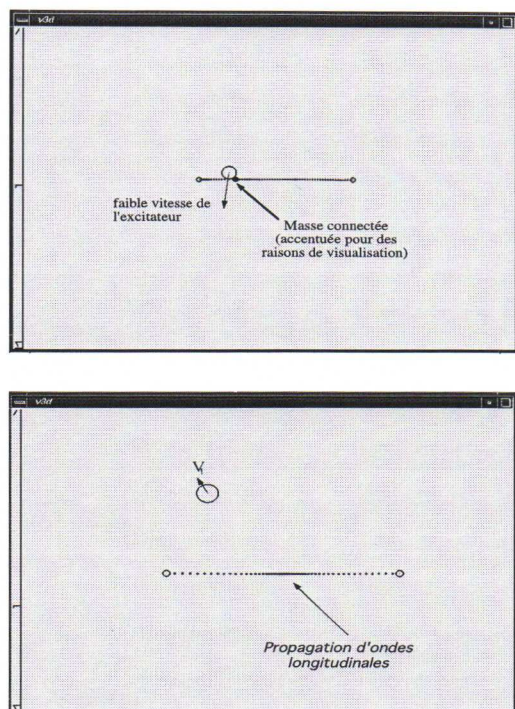


Fig. 11 : filament siège d'un comportement non-linéaire de type B, pendant l'excitation et pendant la phase libre

Lorsque le type B est particulièrement audible, les ondes longitudinales (créées par un "glissement" de l'excitateur le long de la masse excitée au cours du contact, voir fig. 12) sont à basse fréquence et d'amplitude importante relativement à celle des ondes transversales. Elles provoquent une modification locale de l'allongement  $l$  donc de la force exercée par

les <LIA> sur les masses auxquelles ils sont connectés. La force de rappel transversale est alors modulée à basse fréquence, tout comme la fréquence de l'oscillation transversale, ou fréquence fondamentale du son.

Le couplage des modes dans les cordes est parfois pris en compte dans les études de la mécanique des cordes vibrantes [CUESTA 90], [VALETTE 93], [WATZKY 90]. Le filament 2D réalise une traduction de ces études.

#### 4.3.3. Type perceptif C et troisième non-linéarité

Le type C n'apparaît que dans quelques cas rares, et se présente toujours comme un cas limite. Notamment :

- lorsqu'on augmente la vitesse de l'excitateur sur un filament présentant originellement la non-linéarité de type A, le type C apparaît brusquement;
- lorsqu'on diminue la sphère d'influence (Seuil\_excit) de l'excitateur sur un filament présentant originellement la non-linéarité de type B, celui-ci adopte un comportement chaotique. En continuant à diminuer le seuil, la stabilité revient et le filament présente une non-linéarité de type C.

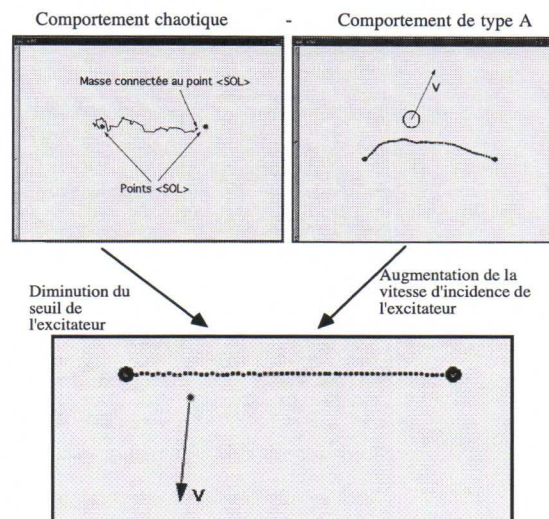


Fig 12 : filaments avant et après l'apparition de la non-linéarité C : passage Chaos-> type C et Type A-> type C

A l'audition (fig. 13), le type C présente la fondamentale habituelle du filament (celle de son équivalent topologique) à laquelle se rajoute un son aigu d'apparence harmonique, à caractère métallique, très prégnant et de notre point de vue gênant.



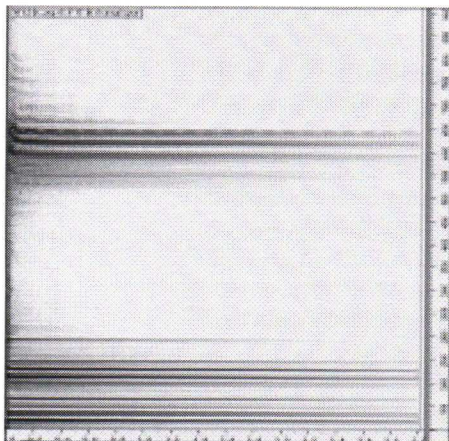


Fig 13 : sonagramme présentant le type cognitif C.

Enfin, on peut noter à la visualisation (fig. 12) que, lorsque le filament présente le type perceptif C, l'excitateur traverse la corde sans que sa direction et sa vitesse soient grandement perturbées : une mauvaise transmission de l'énergie semble caractéristique de l'obtention du type C. Nous n'avons pas pu lui trouver d'équivalent dans des instruments réels.

#### 4.4. Conclusion sur le "filament 2D"

De cette étude des paramètres du filament 2D, on peut conclure que ce modèle est particulièrement sensible aux valeurs des paramètres. Cela est généralisable à l'ensemble des structures CORDIS à spatialité non triviale : à certaines valeurs des paramètres est associé un comportement particulier, révélant plus ou moins certaines des non-linéarités dont l'objet peut être le siège. *Une même structure spatiale donne donc des timbres très différents suivant l'aire où l'on se situe dans l'espace de ses paramètres.*

Cette étude montre également que quels que soient les paramètres utilisés (ou quelle que soit la région où l'on se situe dans l'espace des paramètres du modèle), *le filament 2D présente une corrélation nette entre le timbre du son produit et l'intensité de l'excitation.*

Cette dépendance est bien connue dans les instruments réels, qu'on les écoute ou qu'on les modélise : il n'est pas nécessaire d'entendre avec un niveau de sonie élevé (un fort volume) un piano enregistré pour savoir si le pianiste joue fortissimo ou pianissimo ; la qualité du timbre (centroïde spectral...), l'importance des dispersions harmoniques, l'intensité du couplage des cordes sont autant d'indices que notre oreille peut analyser et traduire en "intensité de l'excitation".

*Ainsi, la sensibilité intrinsèque des structures spatiales CORDIS au niveau d'excitation peut se révéler, si elle est maîtrisée, de première importance en regard du principe psychoacoustique dit de "causalité".*

## 5. Filament 2D et geste de modification

### 5.1. Geste de modification et spatialité

Un objet CORDIS-ANIMA d'extension spatiale non nulle peut recevoir des précontraintes, ce qui n'est pas le cas pour un objet-point. Si ces précontraintes sont modifiées au cours du temps, le comportement oscillatoire de l'objet va, lui aussi, être modifié.

Claude CADOZ a établi une typologie du geste instrumental [CADOZ 92b]. Suivant sa terminologie, le *geste de modification* consiste à modifier la structure vibrante pendant son évolution même. Le geste de modification est dit *structurel* s'il transforme fondamentalement la structure de l'instrument, en en supprimant ou ajoutant par exemple une partie. Il est dit *paramétrique* s'il modifie continûment certaines propriétés de l'objet sur lequel le musicien l'applique, ou s'il agit sur un paramètre de cet objet. La modification de la précontrainte, que nous allons aborder dans ce qui suit entre dans la catégorie des gestes de modification paramétrique.

L'un des intérêts fondamentaux des structures à extension spatiale non nulle apparaît ici : un geste de modification paramétrique, qui consiste en une déformation continue de l'objet et *s'inscrit dans l'espace*, peut être traduit directement dans l'environnement CORDIS s'il s'applique à une structure à extension spatiale non nulle. Pour être appliqué à un objet topologique, un même "geste" devrait modifier dynamiquement des paramètres intrinsèques de l'objet, tels la raideur des liaisons ou la masse des points matériels.

### 5.2. Éléments pour un éditeur de gestes

Par construction, le filament 2D peut donc être soumis à un geste de modification : celui qui consiste à tirer sur la corde - donc à modifier la précontrainte. Pour expérimenter ce geste de modification paramétrique, nous avons d'abord "fait quelques gammes", modulant la tension de précontrainte par des fonctions mathématiques (linéaires, exponentielles, sinusoïdales).

Afin de pouvoir tirer parti des potentialités qui ont été mises en évidence, un *éditeur graphique de partition gestuelle* a été réalisé : il permet de tracer en fonction du temps la valeur de la tension de précontrainte appliquée à la corde, et les instants et intensités des percussions qu'on lui applique.

Cet éditeur rapproche notre modèle de filament 2D d'un véritable "instrument" musical : le filament n'est plus seulement une structure permettant de synthétiser un son, mais un instrument que le compositeur peut modifier, déformer, exciter de



différentes manières au cours du temps.

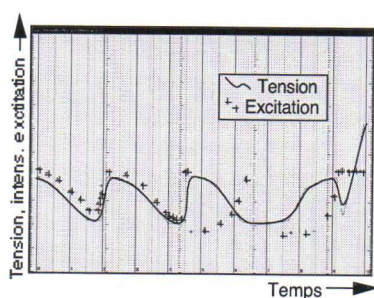


Fig 14: Une partition gestuelle pour le filament 2D

La fig. 14 présente un exemple d'une telle partition. Les résultats sonores sont particulièrement riches et conviviaux et mettent bien en évidence l'intérêt de la multidimensionalité des structures CORDIS pour l'exploitation musicale.

## 6. Conclusion

Trois espaces décrivent la spatialité d'une structure vibrante CORDIS-ANIMA :

- l'espace des mouvements qui détermine le coût de calcul donc le temps nécessaire à la simulation.
- l'extension spatiale dont dépend la singularisation de certaines ondes et la possibilité d'appliquer une précontrainte.
- l'espace de simulation, somme des deux précédents, dont la dimension confère des non-linéarités intrinsèques à l'objet.

L'étude du filament 2D présentée ici a démontré l'intérêt de l'utilisation de modèles non-topologiques pour la synthèse sonore par modèle physique à l'aide du formalisme et des algorithmes CORDIS-ANIMA.

Cet intérêt se manifeste à travers les trois points pressentis lors de l'étude théorique de la spatialité :

- la non-linéarité intrinsèque aux modèles spatiaux qui leur confère, comme pour les structures réelles, un comportement évoluant de manière perceptible avec l'intensité de l'excitation qu'on leur applique et qui renforce le recours au modèle physique.
- leur capacité à recevoir une contrainte aux frontières, ou geste de modification paramétrique, qui permet de modifier dynamiquement leurs propriétés vibratoires de manière physique, ce qui n'est pas le cas pour les modèles ponctuels.
- la diversité des comportements que peut adopter un modèle spatial suivant les valeurs de ses paramètres, conséquence du couplage entre les non-linéarités de ses équations de fonctionnement et la singularisation de ses directions de mouvements permise par son extension spatiale.

Enfin, la spatialité des objets CORDIS présente à notre avis d'autres caractéristiques qui n'ont guère été explorées jusqu'alors : elle est indissociable de leur

capacité à rayonner dans un "espace propagatif". Dans la prolongation de ces travaux, nous nous intéresserons à l'environnement global des objets, c'est à dire à un environnement dans lequel ils seraient plongés [CADOZ 92a] : après la spatialité de l'objet, nous étudierons la spatialisation des sons qu'il produit.

## Bibliographie

- [CADOZ 81] C. Cadoz, A. Luciani, JL Florens - Synthèse musicale par simulation des mécanismes instrumentaux. Transducteurs Gestuels Rétroactifs pour l'étude du jeu instrumental. - *Revue d'Acoustique* N° 59 (279-292) Paris 1981.
- [CADOZ 90] : C. Cadoz, A. Luciani, JL Florens - "Cordis-Anima, système de modélisation et de simulation d'instruments et d'objets physiques pour la création musicale et l'image animée" - *Colloque international Modèles physiques, création musicale et ordinateur*, (1990).
- [CADOZ 92a] : C. Cadoz - "Expérimentation de Structures physiques pour la création de sons musicaux" - *rapport interne décembre 1992*.
- [CADOZ 92b] : C. Cadoz - "Le geste, canal de communication homme / machine ; la communication instrumentale" - *rapport de recherche ACROE, mars 1992*.
- [INCERTI 95] : E. Incerti, C Cadoz - "Modélisation et simulation de structures vibrantes en CORDIS; Matériaux et paramètres pour la création musicale" - *Journées d'Informatique Musicale*, 1995.
- [RISSET 90] : J.C. Riset - "Modèle physique et perception - Modèle physique et composition" - *Colloque Modèles Physiques Création Musicale et Ordinateur Vol.III (711-720) - Grenoble 1990*.
- [WATZKY 90] : A. Watzky - "Vibration des cordes en régime non-linéaire : modèle bidimensionnel" - *Premier congrès français d'acoustique, supplément au Journal de Physique, tome 2, 1990*.
- [CUESTA 90] : C. Cuesta - "Corde vibrante isolée mécaniquement, amortissements, non-linéarités ; application au clavecin et à la tempoura" - *thèse soutenue à l'université du Maine le 9 Mars 1990*.
- [VALETTE 93] : C. Valette, C. Cuesta - "Mécanique de la corde vibrante" - *traité des nouvelles technologies, série mécanique, ed. Hermes 1993*.